

ネオン管を用いた電磁波の視覚化

塚 田 修 二*

実験室で火花放電を起こさせ電磁波を発生させると定常波ができ、電磁波が互いに強めあうところでネオン管を光らせることができた。その結果、ネオン管を一定間隔で同時に光らせ、電磁波の存在をあたかも見えるようにすることができた。また、市販トランシーバーのアンテナ端子をレッヘル線に接続すると、そこに定常波ができネオン管を光らせることができた。さらに、その光った位置から電磁波の速度を求めることができた。

I はじめに

1888年H. R. ヘルツが初めて「見えない電磁波を見る」ことに成功¹⁾(電磁波の存在を実証)して以来、それを発生させる技術は飛躍的に進歩していった。現在ではラジオ、テレビをはじめ様々な情報の通信手段としてなくてはならない存在であるが、他の科学技術と同様にその発生機構はますます高度化しブラックボックス化してきている。そのために、どんな電磁波でも発生させるにはつねに高度な技術が必要だと思われ、電磁波は難しいという印象をもたれているようである。しかし、雷が鳴ったときや家電製品の電源を入れたときにラジオ、テレビなどでガリッという雑音をよく聞くが²⁾、電磁波はこのような身近なところで簡単に発生している。

そこで、簡単な装置で電磁波を発生させ電磁波を見えるようにできれば、児童・生徒が電磁波を身近に感じることによって、興味・関心を高め、理解を深めると考えた。今回、身近な材料を用いた簡単な電磁波の発振装置と検波装置を自作し、電磁波の存在を見ることができた。また、アマチュア無線用トランシーバーを用い、ネオン管の光る位置から電磁波の速度を求めた。

II 研究の進め方

ヘルツが考案した電磁波発振装置(ヘルツダイポール³⁾)と検波器(図1)は人工的に電磁波をつくりだし検出できる最も単純な装置^{4), 5)}である。これに改良を加えた「見えない電磁波を見る。」実験^{6), 7)}がいろいろ行われてきている。これらの実験にはヘルツダイポールがそのまま用いられ、検波器にライターの火花や摩擦電気でも簡単に光るネオン管が用いられている。この方法を用いると、簡単に定常波の観測ができる。

この実験を行った結果、実験室だと10m以上、廊下だと30m以上離れたところで発生した電磁波を検出することができた。また、廊下では定常波を検出できなかったが、実験室では定常波ができその性質を調べることができた。しかし、実験を進めていくにつれていくつかの問題点が見いだされた。まとめ

* 理科長期研修員(白根地区理科教育センター, 新潟市立笠木小学校)

ると次のとおりとなる。

ア 検波器が1個で電磁波の検出だけに主眼が置かれている。

イ 火花間隔を調節する操作が困難なために定常波を検出できないことがある。

ウ あらゆる周波数の電磁波を発生しているので、定常波の波長を求めても、電磁波の速度を求めることができない。

これらの問題点を改善し、電磁波の存在をより具体化するために次の4つの実験を試みた。

実験1 多くの検波器による検出

電磁波が空間に存在していることをより具体的にイメージさせるために検波器をたくさん用い、ネオン管が強く光るところと弱く光る(光らない)ところを同時に示すようにした。ヘルツダイポールを火花放電させ、そのときに発生する電磁波を利用してこの実験を行った。

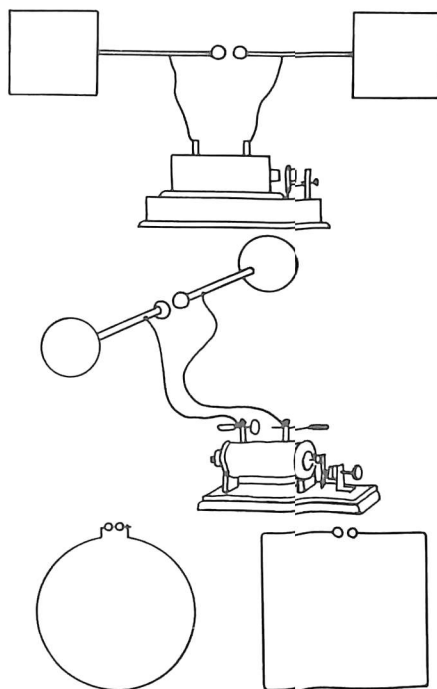


図1 ヘルツダイポールと検波器

実験2 レッヘル線上での定常波の検出

誘導コイルにレッヘル線を接続した。レッヘル線上に定常波をつくり、検波器の光の強弱がはっきり分かるようにした。

実験3 市販トランシーバーを用いたレッヘル線上での電磁波の速度の決定

実験1, 2では電磁波の発振周波数を決定できないので、周波数が分かっている電磁波発振装置を用いて電磁波の速度を決定した。用いた装置は、レッヘル線、周波数450MHzアマチュア無線用トランシーバー(以後トランシーバーと呼ぶ)である。

実験4 市販トランシーバーを用いた空間中の電磁波の検出

トランシーバーを用いレッヘル線上に定常波を発生させたあと、電磁波の放射の原理⁸⁾に従ってレッヘル線を一直線になるように広げダイポールアンテナ⁹⁾(以後アンテナ)にした。このとき発生した電磁波を検出した。

III 実験

1 ヘルツダイポールによる火花放電の場合

(1) 実験装置

3種類の発振器を製作した(図2)。この中には、ヘルツが電磁波を検出したときに用いたものと同じタイプのヘルツダイポール(以後発振器と呼ぶ)が含まれている。金属板は40cm×40cm(今回は銅板)、直径12mmの鋼球、直径10mmの導体棒(鉄製スタンドの支柱など)を用いた。銅板と導体棒を固定したり

導体棒と銅球を固定したりするときはガムテープを用いた。それぞれ固定したら90cm×24cm×12cmの角材にガムテープを用いてつり下げ、図3のようにセットした。鉄製スタンドを用いて装置を支えた。火花間隔は数mmにした。誘導コイルは市販のもの（中村理科無接点型）を用いた。

検波器は直径2mm銅線とガラス筒状のネオン管をハンダ付けし、直径を70cmにした（図4）。検波器を素手で持つとびりびり感じ、また、形を保てないので木枠をつけた（図5）。

県立教育センター内の3つの実験室で実験を行った。実験室1（縦7m×横7m×高さ3m）、実験室2（7m×14.8m×3m）、実験室3（16m×20m×6m）である。向かい合う1つの壁のそばに長机などを用いて装置を置き、誘導コイルにより火花間隔に火花放電を起こさせ電磁波を発生させた。

ここで、電磁波が発生しているとき検波器はどのような影響を受けて光るのか、図6に示した。

(a)の向きでは検波器の面が磁場Bの方向と一致しているので、磁場Bは共鳴に関係がない。電場Eによって円周に沿ってわずかな振動電流が生じる。(b)のとき磁場Bの変化が大きく影響し振動電流が生じる。電場Eの変化も作用しないわけではないが主な原因は磁場Bにある。(c)のとき電場Eの変化も磁場Bの変化も両方作用して振動電流が生じるので、この向きが最も電磁波を検出できる。(d)のとき電場Eの変化も磁場Bの変化も両方作用しないので電磁波を検出しにくい¹⁰⁾。

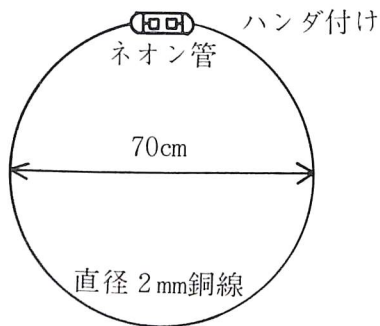


図4 検波器

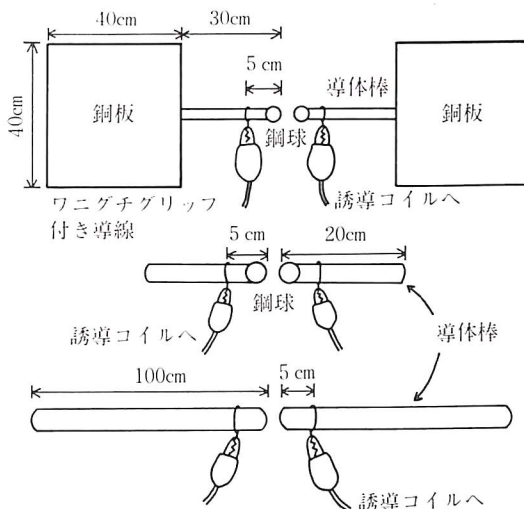


図2 ヘルツダイポール

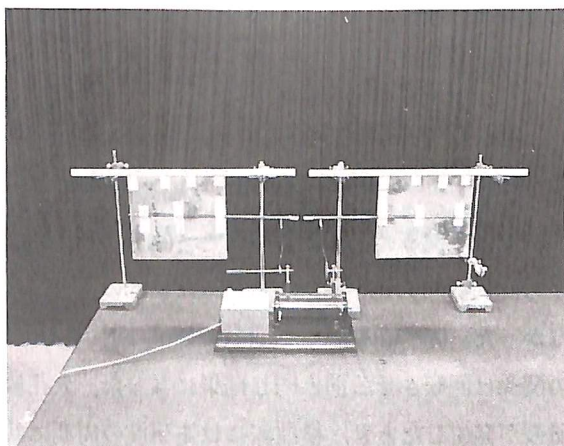


図3 実験装置1

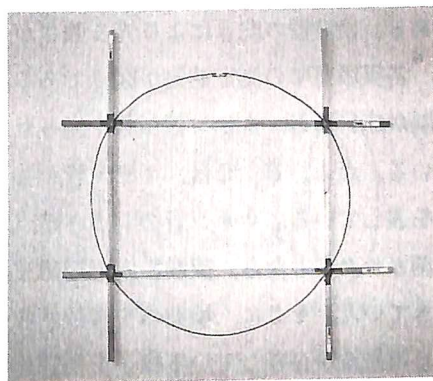


図5 移動用検波器

(2) 実験手順

図7のように火花放電するところを $x y z$ 座標軸の原点に取る。検波器のネオン管を火花放電に向け、 $x y$ 座標平面に平行にして x 軸方向(もうひとつの壁の方向)に移動させる。同様に、 $z x$ 座標平面に平行にして x 軸方向に移動させる。また、検波器を同一平面内で 180° 回転し同様の操作を行った。

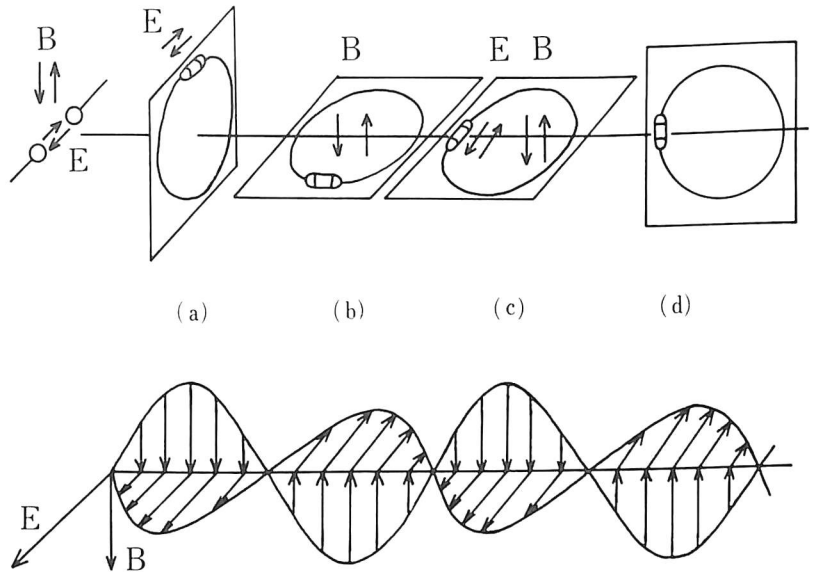


図6 検波器の向きとネオン管の光る強さ

暗幕などを用い実験室を暗くして観測し、検波器のネオン管が強く光るところ(明点)と弱く光るところ(暗点)で観察していった。

(3) 結果

検波器を図6のように置いたとき(a)~(d)のネオン管の光の強さの関係は(a)>(b)=(c)>(d)になった。(d)のときはほとんど光らなかった。(a)~(d)を同一平面内で 180° 回転させたが光の強さの関係は回転させる前と同じ結果になった。火花放電により電磁波が発生したとき、検波器には電磁波の周期に共鳴した振動電流が生じネオン管が光った。図8は(c)と(d)を同時に配置したときのネオン管の光る様子である。検波器の向きにより光る強さが違った。

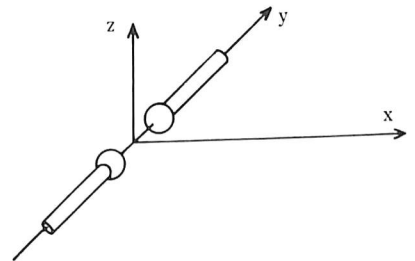


図7 検波器の移動方向

各実験室での測定結果が図9である。図で線の間隔が広いほど、ネオン管が強く光ったことを表している。点A, B, Cは、ネオン管が強く光った位置を表している。ネオン管の明点と暗点が周期的に観測されたことから、実験室内で電磁波の定常波ができていた。そこに、検波器を複数個並べることでより電磁波が存在している様子を視覚化することができた(図10)。



図8 検波器の向きによる光の強さの違い

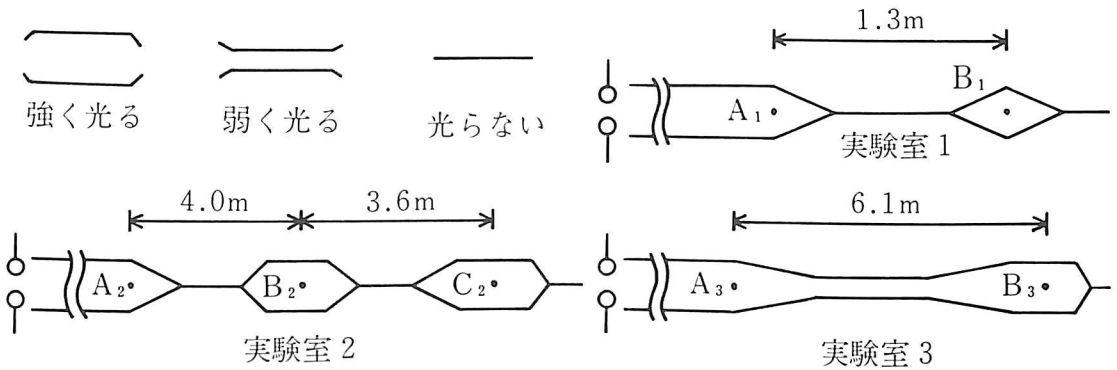


図9 測定結果1

火花放電による電磁波発生は長波から極超短波までいろいろな周波数成分を含むが¹⁰⁾、周波数成分の一部の電磁波が実験室で空洞共振を起こし、定常波をつくったと考えた。それは、同一実験室で発振器を替えても波長の変化は観測されなかったからである。



図10 電磁波の定常波1

表1 空洞共振周波数 f

	実験室 1	実験室 2	実験室 3
λ	2.6m	7.6m	12.2m
f	115.4MHz	39.5MHz	24.6MHz

定常波ができているとき、ネオン管の明点間の距離が電磁波の半波長になっている¹²⁾、ということを利用して各実験室での波長を求めた（表1）。電磁波の速度 ($3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) は一定だと考えて、求めた波長 λ から空洞共振周波数 f を計算した（表1）。計算の結果から実験室が大きくなると長い波長の電磁波成分が定常波になりやすいことが分かった。

2 誘導コイルにレッヘル線を接続した場合

(1) 実験装置

真鍮レール（穴あきの市販品167cm）をレッヘル線にして図11の装置を作った。

誘導コイルの火花間隔を数mmにし、レッヘル線に接続した。レッヘル線は床に直接置かず長机、木板などを用い床からおよそ70cm離し、床の鉄筋の影響を受けないようにした。レッヘル線をつなぎ合わせるときは接続部分をアルミホイル片で巻きセロテープで固定した。

(2) 実験手順

検波器のネオン管をレッヘル線側に向けて、検波

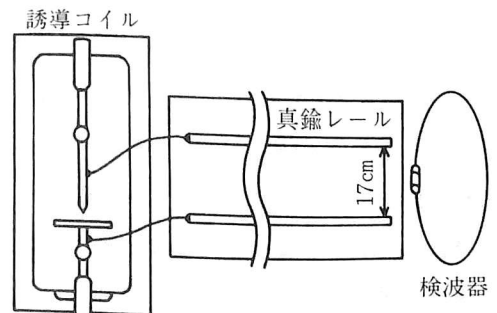


図11 実験装置2

器とレッヘル線が垂直になるようにして移動した。検波器は実験1で用いたものである。ネオン管が光るところは幅があるのでその中点を明点とした。レッヘル線(R)の長さをそれぞれ167cm, 250cm, 334cmにして実験した。

(3) 結果

図12はレッヘル線上で検波器のネオン管が光っている様子である。図13はその測定結果である。実験1と同様に線の幅が広いほどネオン管が強く光ったことを表している。ネオン管の明点と暗点を容易に観測することができた。明点間の距離の平均から波長 λ を求めた(表2)。

レッヘル線に電磁波の定常波ができるとき波長短縮が起こり¹³⁾、波長は理論値より短くなる。レッヘル線の材質や周波数により短縮率は異なり、それを考慮して共振周波数 f を求めた。真鍮の波長短縮率を0.88として得た結果が表2である。この実験の場合、レッヘル線の長さによらずほぼ同じ周波数で共振していることが分かった。

3 トランシーバーにレッヘル線を接続した場合

(1) 実験装置

市販のアマチュア無線用トランシーバー(三菱電機FM-67, 450MHz, 送信出力5W)を用い、アンテナケーブルの内部端子と外部端子をワニグテグリップ付きの導線でレッヘル線(実験2で用いた真鍮レール L_1 と2mm銅線 L_2)に接続した(図14)。レッヘル線間隔は3cmにした。検波器は直径2mm銅線とネオン管をハンダ付けし、4種類を用いた(図15)。33.3cm, 66.7cmは周波数が450MHzの半波長, 1波長分に相当する理論値の長さである。半波長の整数倍の検波器が定常波を検出しやすいと考えた。半波長の整数倍でないものとして80cmを選んだ。

(2) 実験手順

検波器はレッヘル線に接触させながら移動した。ネオン管が光る位置は幅があるので、その中点を明

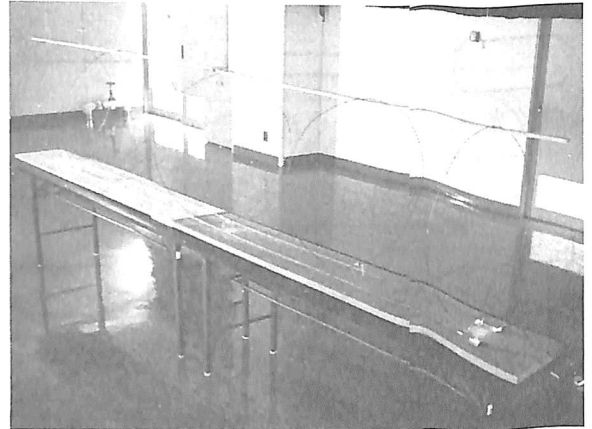


図12 電磁波の定常波2

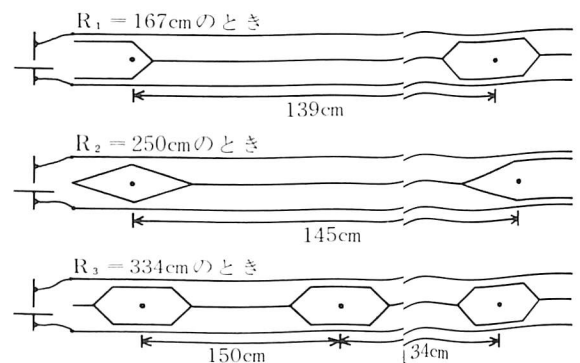


図13 測定結果2

表2 レッヘル線上の共振周波数 f

	$R_1 = 167\text{cm}$	$R_2 = 250\text{cm}$	$R_3 = 334\text{cm}$
λ	3.16m	3.30m	3.23m
f	94.9MHz	90.9MHz	92.9MHz

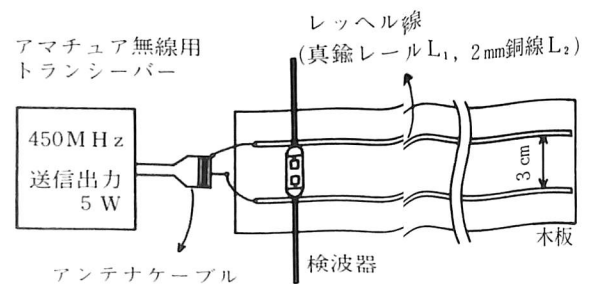


図14 実験装置3

点とした。

(3) 結果

ネオン管の明点と暗点をmm単位で測定でき、操作は実験2より容易だった。しかし、実験1, 2のようにネオン管を同時に光らせることはできなかった。

真鍮レール L_1 のとき、長さが33.3cmの検波器はどの位置に置いても光らなかった。長さが80cmの検波器は光り方が不安定で手を近づけたり遠ざけたりすると光ったり消えたりした。ネオン管のみと長さが66.7cmの検波器を用いて測定した結果が図16-aである。

2mm銅線 L_2 のとき終端点がオープンになっていると光り方が不安定だった。そこで、終端点を2mm銅線でショートさせ図16-bの結果を得た。この場合はネオン管が光る位置がずれるが、終端点がオープンになっているときと同様にして、光った位置を測定して波長を求めることができる。

図17はネオン管が L_1 上で規則的に光っている様子である。

図16の測定値の平均と波長短縮率がそれぞれ真鍮0.88, 2mm銅線0.98から波長 λ を求めた（表3）。これと周波数450MHzから電磁波の速度 C を求めた。 L_1 のときは理論値に近い値を得ることができた。固くて変形しにくくまっすぐな L_1 に比べ、曲がりやすくまっすぐにするのが困難な L_2 は、理論値に近い値を得ることができなかった。

4 トランシーバーに2mm銅線のダイポールアンテナを接続した場合

(1) 実験装置

実験3で用いたトランシーバーのアンテナ端子に自作の2mm銅線アンテナ（全体の長さ50cm）をワニグチグリップ付き導線で接続した。実験3の検波器を長さ50cmにした（図18）。

(2) 実験手順

アンテナに平行に検波器を移動させ、光る位置に

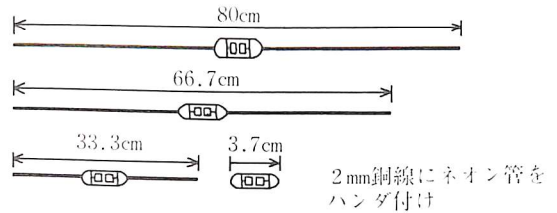


図15 検波器

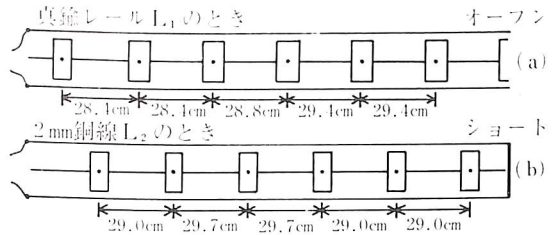


図16 測定結果3



図17 電磁波の定常波3

表3 電磁波の速度

	真鍮レール L_1	2mm銅線 L_2
λ	65.6cm	61.8cm
C	$3.0 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$	$2.8 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$

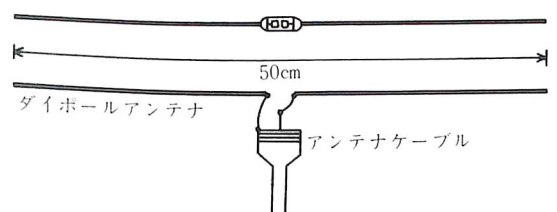


図18 実験装置4

検波器を置いていった。

(3) 結果

検波器は同時に3本まで光った(図19)。空洞共振のような反射面がなくても、またレッヘル線がなくても空間にある電磁波を見ることができた。アンテナと最初の検波器の位置を3.5cm, 5.0cm, 9.0cmと変えたがネオン管が光る位置の間隔はあまり変わらなかった。光った位置から、波長の平均を求めると19.2cmになり、これから周波数を求めると1562.5MHzになった。発振周波数450MHzと一致しないのはアンテナ端子と自作アンテナがマッチングがとれていないためにスプリアス放射を起こしていると考え¹⁴⁾。

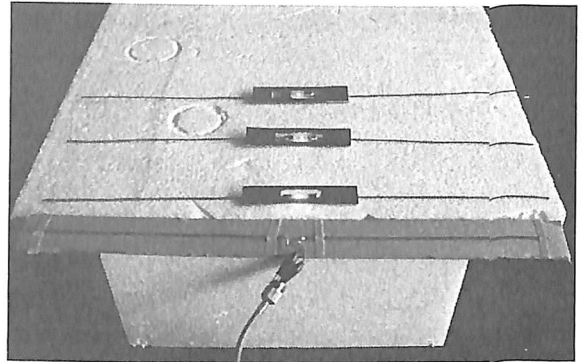


図19 電磁波が見えた様子

IV おわりに

身近な材料を利用した簡単な4つの装置で電磁波を見ることができた。後藤尚久氏は「電磁波とはなにか」の最後を電気力線と磁力線を頭の中に描けるようになれば電磁波が見えてくると結んでいるが、この実験がその一助になればと思う。今後、この装置の教材としての有効性を確かめていきたい。

この研究を進めるにあたり、アンテナ理論および工学について、県立教育センター情報処理教育課長遠藤登志弘氏をはじめ多くの方々からご指導いただいたことに感謝の意を表する。

文 献

- 1) 小山慶太：神さまはサイコロ遊びをしたか，文藝春秋(1993) p.163.
- 2) 後藤尚久：電磁波とはなにか，講談社(1984) p.170～171.
- 3) アンテナハンドブック，CQ出版社(1970) p.268.
- 4) 二見一雄：電気の世界，東京オーム社(1967) p.69.
- 5) 高木純一：電気の世界，東京コロナ社(1970) p.238.
- 6) 愛知・岐阜物理サークル編：いきいき物理わくわく実験，新生出版(1988) p.196～197
- 7) 林 熙宗：電気振動・電気共振・電磁波をつなぐ実験教材の開発，東レ科学振興会(1991) p.6～8
- 8) 前出2) p.139.
- 9) ワイヤアンテナ・ハンドブック，CQ出版社(1974) p.17～18.
- 10) 金原寿郎：電磁気学(III)，裳華房(1974) p.211～212.
- 11) 前出2) p.171～174.
- 12) 物理実験事典，講談社(1973) p.481～486.
- 13) V. UHFハンドブック，CQ出版社(1971) p.250～251.
- 14) 前出3) p.306～318